

Л.В. ДЕРБУНОВИЧ, д-р техн. наук, проф. каф. АУТС НТУ «ХПИ»
Л.С. АБРАМОВА, канд.техн.наук, доцент кафедры ТС ХНАДУ
(г. Харьков)

ИЕРАРХИЧЕСКИЕ СТРУКТУРЫ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ДОРОЖНЫМ ДВИЖЕНИЕМ

В статті запропонована нова даймонд структура організації управління дорожно-транспортними потоками, в якій розмеження інформаційних рівней керування поєднуються з розподілом інформаційних та управляючих потоків даних.

In the paper the new Diamond structure of the hierachycal Intellident Transport System is proposed. The effective control of the traffic flow is achived by using different ways to carry control and information traffic data.

Постановка проблемы. В настоящее время увеличение парка автотранспортных средств в Украине происходит очень высокими темпами. Так, за последние 10 лет он увеличился на 70%. При этом, если в 2001 году уровень автомобилизации составлял 135 авт/1000 жителей, то по прогнозу в 2010 году он составит 200 авт/1000 жителей. Такой рост интенсивности транспортного потока (ТП) приводит к ухудшению показателей безопасности дорожного движения, уменьшению пропускной способности улично-дорожной сети (УДС) городов и увеличению времени простоя автотранспортных средств в заторах. Проведенный анализ пропускной способности в центральной части г. Харькова [1] показал, что скорость сообщения в результате повышения интенсивности ТП снизилась до 10 км/час.

Радикального улучшения условий движения транспорта в городе на длительную перспективу можно достичь при осуществлении мер градостроительного характера: строительством мостов, тоннелей, пробивкой новых магистралей. Осуществление таких проектов требует значительных финансовых вложений и затрат времени. Анализ показывает, что значительно смягчить ситуацию позволит комплекс мероприятий, связанных с совершенствованием управления ТП в городе – внедрением компьютеризованных автоматических систем управления дорожным движением (АСУДД) на уличной сети городов.

Безопасность дорожного движения и эффективность управления транспортными и пешеходными потоками в значительной мере определяются качеством организации дорожного движения (ОДД), надежностью и отказоустойчивостью программно-технических средств систем управления дорожным движением. Поэтому разработка принципов организации дорожного движения (ДД) и систем управления (СУ) транспортными

потоками, необходимость использования современных технологий связи и управления разработка принципов управления является весьма актуальной проблемой в настоящее время.

Анализ литературы. При решении проблемы организации дорожного движения и управления транспортными системами (ТС) в международной практике широко используется система Интеллектуальной Транспортной Инфраструктуры (*Intelligent Transportation System*, далее *ITS*), способной эффективно управлять существующей дорожно-уличной сетью дорог с учетом ее плотности и пропускной способности [2,3]. Под *ITS* понимают использование последних достижений информационных технологий и систем связи, управления, компьютерного оборудования и программного обеспечения для улучшения эффективности и безопасности работы наземного транспорта. Отличительный признак таких систем – автоматическое (или с минимальным участием оператора) формирование управляющих воздействий в режиме реального времени на объекты ТС. Для этого в системе должна функционировать обратная связь, обеспечивающая автоматическую передачу данных о работе объектов ТС в блок управления.

Аббревиатура *ITS*, появившаяся в США, стала международно признанным сокращением для Систем Информационного Обеспечения Транспорта. Внедрение *ITS* значительно изменило всю структуру наземных перевозок в мире. В 1991 г. Конгрессом США был принят специальный законодательный акт *ISTEA*, об увеличении пропускной способности автомобильных дорог, уменьшении или исключении транспортных заторов, повышении уровня безопасности движения за счет применения передовых современных технологий.

Известны следующие структуры АСУ – децентрализованные, централизованные и иерархические [4-6]. При этом основными функциями управления являются: сбор параметров ТП первичными детекторами транспорта, передача информации в центр управления, расчет управляющих воздействий и их передача в дорожные контроллеры, которые управляют светофорными устройствами или управляемыми дорожными знаками [7]. Существующие АСУДД функционируют в режиме реального времени и вне его или на комбинации этих режимов. Однако реализация приведенных принципов управления в мегаполисах несущественно влияет на эффективность дорожного движения, так как имеет место запаздывание управляющих воздействий, которое является причиной образования заторовых ситуаций на УДС городов.

Цель статьи – на основе анализа современных тенденций развития АСУДД обосновать иерархическую структуру современной системы управления ТП, обеспечивающей эффективность и безопасность дорожного движения.

Функции АСУДД. Известно, что длина затора, его продолжительность и количество автотранспортных средств, его образующих, являются последствиями применяемых методов и СУ ДД. В большинстве СУ

управляющие воздействия направлены на устранение препятствий движению, а не на предотвращение их. При современном состоянии ДД постоянно возрастает количество участков УДС города, которые можно рассматривать как «узкие» места транспортной сети. Следовательно, имеют место пространственные взаимоотношения между нестандартными и небезопасными ситуациями по всей транспортной сети в целом, что предполагает наличие взаимной связи между управляющими воздействиями. Стратегия управления должна обеспечивать решение задачи управления в целом по сети так, чтобы управляющие воздействия УДС не усложняли движение или нейтрализовали друг друга. Поэтому одним из важнейших аспектов проблемы управления ДД является определение совокупности управляющих воздействий и последовательности их реализации системой управления, которая должна быть распределенной с рациональной степенью децентрализации и функционировать в режиме реального времени. Следовательно, при построении АСУДД кроме традиционных функций управления возникает необходимость в решении задачи координации управляющих воздействий.

Функциональная схема распределенной системы управления.

Проблемы согласования взаимодействий между отдельными объектами и подсистемами, необходимость оперативного реагирования на существенно меняющиеся внешние условия, многорежимность функционирования и противоречивость требований, предъявляемых к системе в целом, породили новые функциональные задачи координации, оперативного управления и принятия решений в АСУДД. Для установления взаимосвязи традиционных задач с новыми задачами управления рассмотрим типовую функциональную структуру многообъектной системы управления.

В настоящей работе под структурой АСУДД будем понимать: 1) общепринятое качественное определение структуры системы как совокупность элементов, между которыми существуют определенные связи [8]; 2) широко распространенная математическая модель структуры как решетки, т.е. частично упорядоченного множества, в котором каждое двухэлементное подмножество имеет как точную верхнюю, так и точную нижнюю границу [9]. Использование такой математической модели позволит в дальнейшем формализовать множество структур в виде специального ориентированного мультиграфа.

За счет наличия сложных взаимосвязей между отдельными элементами системы, большой размерности переменных, характеризующих систему в целом, систему управления проектируют в виде иерархической системы, на каждом функциональном уровне которой средствами вычислительной техники решаются задачи управления определенного типа.

Выделим последовательно четыре уровня управления: локального регулирования (уровень САР), локальной оптимизации (уровень САУ), координации локальных систем оптимизации, оперативного управления и принятия решений (рис. 1).

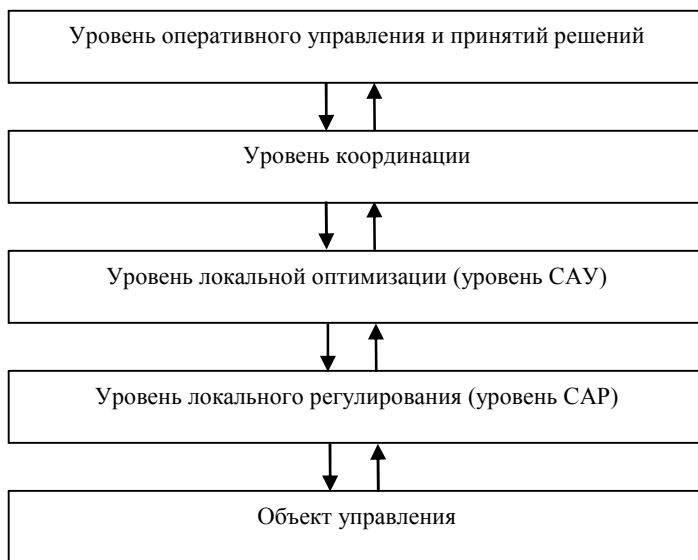


Рис. 1. Иерархическая структура системы управления

Рассмотрим задачи, решаемые на каждом уровне иерархии АСУДД.

Объектом управления в АСУДД являются транспортные потоки. Под характеристикой объекта понимается вектор, компоненты которого – значение интенсивности, скорость потока и показатели качества управления (например, длительность задержки, число остановок и т.д.). При описании объекта необходимо учитывать и ряд особенностей, характерных для этого сложного социального объекта:

- высокая сложность объекта управления, связанная с его спецификой и объясняемая, прежде всего, возможностью возникновения отличий цели управления объектом от целей его элементов;
- стохастичность поведения объекта, связанная с высоким уровнем случайных возмущений;
- нестационарность.

Таким образом, ТП на дорожной сети как объект управления относится к структурно-сложным объектам высокой размерности, состоящий из набора взаимосвязанных подсистем – *LSS (large scale systems)* система. Основными методами исследования подобных систем является декомпозиция и агрегирование, теоретически обоснованные А.А.Первозванским и В.Г. Гайцгори [10]. Принцип агрегирования предусматривает разбиение транспортных потоков в сети на стандартно описываемые элементы и позволяет рассматривать с единых позиций дорожные сети различных размеров с различными вариантами организации движения.

В [11, 12] предложены двухкомпонентные модели ТП, позволяющие адаптироваться к изменению зависимости интенсивность-плотность ТП.

В [12] для оценки интенсивности ТП предложено использовать экспоненциальную генерирующую функцию в виде

$$q = kv_f \left\{ 1 - \exp \left[1 - \left(1 + \frac{v_j}{nv_f} \left(\frac{k_j}{k} - 1 \right) \right)^n \right] \right\} \quad (1)$$

где q – интенсивность транспортного потока; v_j – скорость потока в свободных условиях; v_f – скорость кинематической волны в заторовых условиях; k_j – максимальная плотность; k – плотность транспортного потока; n – параметр схемы ОДД.

Кривая зависимости интенсивности ТП от плотности и скорости ДД учитывается выбором параметра n , связанного с различными условиями ДД. Использование предложенной модели ТП ДД усложняется противоречиями между реальными данными параметров ДД и детерминированным соотношением в модели, в частности, между постоянным значением плотности ТП и значением максимальной плотности k_m ТП и переменным значением соотношения k/k_m в реальном ТП, а также противоречием между значениями параметров ТП при переходе от стабильного к заторовому. Поэтому учет этих противоречий в моделях ТП является важной проблемой.

Уровень САР. На этом уровне обеспечивается решение задач локального автоматического регулирования, т.е. стабилизации или программного изменения параметров объекта в соответствии с установками, задаваемыми на вышеразмещенном уровне САУ. В качестве технических средств на уровне САР могут быть использованы как цифровые регуляторы (в том числе и микропроцессорные), так и традиционные регуляторы непрерывного действия.

Уровень САУ. Предназначен для оптимизации управления ограниченным комплексом подobjектов, подчиненных соответствующим оптимизаторам. Критерии цели управления, рассматриваемые на этом уровне, могут отличаться от общего критерия функционирования всей системы. Во всяком случае, в них необходимо учитывать «собственные интересы» подчиненных оптимизатору подсистем. Технические средства уровня САУ, а также средства более высоких уровней иерархии должны использовать современные компьютерные технологии и средства скоростной связи и обработки информации.

Уровень координации. На этом уровне осуществляется координированное, т.е. согласованное управление работой локальных оптимизаторов с целью достижения общей задачи функционирования всей системы в целом. При этом для оптимизации используется один или несколько критериев, отражающих «интересы» всей иерархической системы.

Уровень оперативного управления и принятия решений. Как

правило, этот уровень содержит руководящий орган (коллектив специалистов или лицо, принимающее решение (ЛПР)), обеспеченный современными компьютерными технологиями для проведения расчетов возможных вариантов решения. На этом уровне общие цели и задачи, стоящие перед системой, преобразуются в конкретные установки для нижних уровней управления. Кроме того, происходит распределение ресурсов управления между отдельными подсистемами и принятие решений в различных нештатных ситуациях.

Идеальное средство для обеспечения эффективной работы этого уровня – использование «быстрых моделей» нижних уровней иерархии и объекта управления. Особый интерес представляют варианты полной автоматизации функций оперативного управления и принятия решений, обусловленные повышенными требованиями к качеству принимаемых решений и ограничениями на время решения, а также (в отдельных случаях) невозможностью организации условий для нормальной работы ЛПР.

В сфере промышленной автоматизации различных технологических процессов до настоящего момента используется несколько различных архитектур систем управления, но тенденцией последних лет все же стало повсеместное использование *Ethernet*-технологий (ЕТ-системы управления), позволяющих более гибко интегрировать услуги современных технологий связи и управления.

В такой системе взаимодействия с устройствами, составляющими объект управления могут использоваться различные типы устройств:

- IP-видеосерверы, поддерживающие качественное сжатие видеоинформации (*MPEG-4*) и синхронную трансляцию аудио- и видео потоков

- специализированные асинхронные серверы доступа, обеспечивающие подключение сенсоров, датчиков и программируемых устройств управления с устаревшими протоколами последовательной передачи данных *RS-232/422/485* к *Ethernet*-сетям;

- *Ethernet*-серверы ввода и вывода, непосредственно обслуживающие сенсоры, датчики, релейные исполнительные механизмы;

- специализированные шлюзы, например, *ModBus-Ethernet* или программируемые серверы доступа, через которые к *Ethernet*-сети подключаются устройства, поддерживающие другие промышленные протоколы;

- дорожные контроллеры – микропроцессорные устройства, обеспечивающие быстрое преобразование данных или непосредственное локальное управление в узлах транспортной сети. Такие контроллеры взаимодействуют с устройствами контроля и управления на дорогах и за счет встроеного *RISC*-процессора берут на себя большую часть задач системы управления.

В соответствии с *ITS* подходом, а также с задачами, решаемыми на каждом уровне иерархии, АСУДД интеллектуальной транспортной

системы должна строиться по многоуровневой архитектуре с использованием кольцевых *Ethernet*-технологий, которой в большей степени соответствует ромбовидная форма структуры СУ (рис. 2).

Поскольку термин «ромбовидная структура» системы управления применяется в научной литературе для характеристик систем, находящихся под управлением двух управляющих центров, то в дальнейшем будем называть структуры, изображенные на рис. 2, даймонд-структурами (от английского *diamond* - алмаз, ромб).

На рис. 2 приняты обозначения: $0,1 - 0, m_0$ – объекты управления; $\tilde{1}, \tilde{1} - \tilde{1}, \tilde{m}_1$ - датчики информации для локальных регуляторов и наблюдающие устройства; $\hat{1}, \hat{1} - \hat{1}, \hat{m}_1$ - собственно локальные регуляторы (без датчиков), реализующие выбранные законы; $\tilde{2}, \tilde{2} - \tilde{2}, \tilde{m}_2$ – локальные оптимизаторы; $\tilde{2}, \tilde{2} - \tilde{2}, \tilde{m}_2$ – информационные подсистемы для локальных оптимизаторов, воспринимающие информацию от датчиков и перерабатывающие ее в необходимую форму; $\tilde{3}, \hat{1} - \tilde{3}, \hat{m}_3$ – координирующие оптимизаторы; $\tilde{3}, \tilde{1} - \tilde{3}, \tilde{m}_3$ – информационные подсистемы для координаторов; $\tilde{4}, \hat{1}$ – орган оперативного управления и принятия решений; $\tilde{4}, \tilde{1}$ – информационная подсистема для оперативного управления и принятия решений, в том числе информационный зал с системами отображения информации и ЭВМ.

Введение даймонд-структур позволяет более четко выделить и связать задачи двух типов, которые необходимо решать в процессе проектирования систем управления ДД. К первому типу относятся задачи анализа и синтеза динамических контуров управления, структурируемые при проведении «разрезов» даймонд-структуры по вертикали. Второй тип составляют задачи статического расчета, структурируемые при выполнении «разрезов» даймонд-структуры по горизонтали на любом из уровней иерархии информационной или управляющей части системы.

В существующих АСУДД основой алгоритмизации является математическая теория транспортных потоков, на основе которой строятся системы сетевого и координированного управления с прогнозированием динамики транспортных потоков и изменением управляющих параметров светофорного регулирования, работающих в режиме календарной автоматики [4]. Однако в условиях неполного, нечеткого и неточного знания характеристик объекта управления – транспортного потока на дорожной сети, и характеристик окружающей среды, в которой функционирует этот объект, весьма перспективным для построения АСУДД, работающих в режиме реального времени, является использование методов нечеткого управления. Эти методы основаны на извлечении экспертных знаний управления, использовании нечеткого моделирования, где приближительная модель

объекта конфигурируется с использованием импликаций, описывающих возможные состояния системы, или использования самонастраивающегося нечеткого управления с использованием нейронных сетей [13]. Поэтому, эффективность перехода к даймонд-структурам вызвана тем, что требуется:

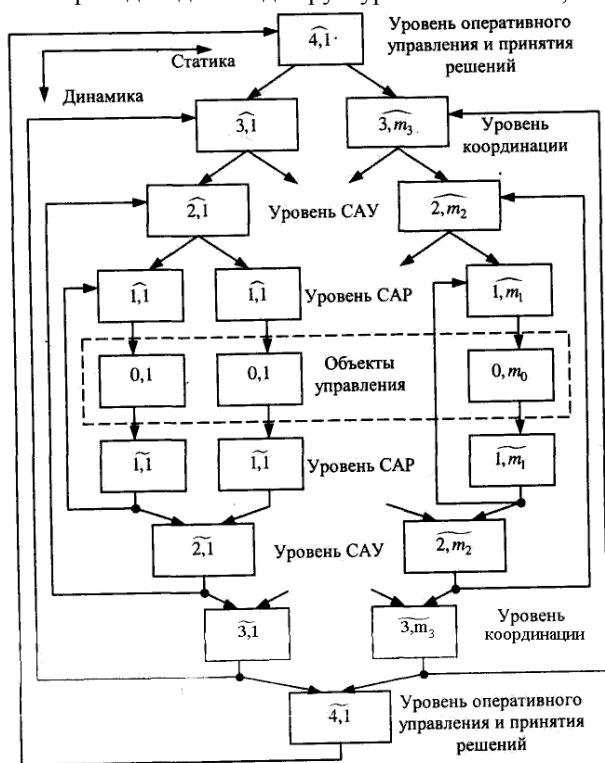


Рис. 2. Даймонд-структура иерархической системы управления ДД

1) разделить управляющие и информационные каналы системы на всех уровнях иерархии, с учетом того, что в некоторых современных многообъектных АСУДД управляющие и информационные звенья разделены территориально;

2) выделить в системе локальные динамические контуры управления для проведения динамических расчетов;

3) рассмотреть типовые задачи статических расчетов, решаемых на каждом уровне в управляющей и информационной подсистемах с учетом детерминированных и нечетких параметров;

4) создать за счет разделения функций «удобное» математическое описание отдельных звеньев и системы в целом, а также упростить

структурные преобразования в процессе проектирования системы.

Таким образом, иерархическая даймонд-структура АСУДД представляет собой многопроцессорную систему управления на основе индустриальных *Ethernet*-устройств, *RISC*-процессоров и современных сетевых технологий. Многочисленные статистические эксперименты, а также опыт промышленного использования подобных систем показывает, что в большинстве случаев отказы микропроцессорных устройств нижнего локального уровня управления ДД обусловлены неустойчивыми неисправностями перемежающегося типа и сбоями, возникающими в результате помех по цепям питания и внешними электромагнитными наводками. Поэтому при постоянном росте числа автомобилей на дорогах к системам управления предъявляются все более жесткие требования к их отказоустойчивости и надежности, выполнения которых можно добиться путем использования современных достижений технической диагностики, встроенных средств диагностирования и восстановления работоспособности АСУДД [1].

Выводы. В статье на основе анализа современных тенденций развития АСУДД предложена и обоснована структура городской системы управления ДД, в которой разделение информационных уровней управления сочетается с разделением информационных и управляющих потоков, что позволяет эффективно использовать современные компьютерные и *Ethernet*-технологии.

Список литературы: 1. Решетников Е.Б., Абрамова Л.С. и др. Анализ организации дорожного движения в центральной части города Харькова // «Вестник ХНАДУ», вып. 29, 2005. – С.116-122. 2. Золотовицкий А.В. Особенности автоматизации управления транспортными потоками // В кн. Безопасность – многоуровневый аспект: Превентивные меры и методы. – Пенза: МНИЦ, 2003. – С.31-33. 3. Рассел С., Норвич П. Искусственный интеллект, современный подход. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2007. – 1408 с. 4. Ветрицкий В.Н., Осипов А.В. Автоматические системы управления движением автотранспорта. – Ленинград: «Машиностроение», Ленинградское отделение, 1986. – 216 с. 5. Иносэ Х., Хамада Т. Управление дорожным движением / Под ред. М.Я. Блинкина: пер. с англ. – М.: Транспорт, 1983. – 248 с. 6. Nilsson N. Learning Mashines. – New York: McGraw-Hill, 1985. – 418 p. 7. Кременец Ю.А. Технические средства организации дорожного движения. – М.: Транспорт, 1990. – 255 с. 8. Цвиркун А.Д. Структура сложных систем. – М.: Сов.радио, 1975. – 200 с. 9. Биркгоф Г. Теория решеток. – М.: Наука, 1984. – 566 с. 10. Первозванский А.А., Гайцгори В.Г. Декомпозиция, агрегирование и приближенная оптимизация. – М.: Наука, 1979. – 344 с. 11. Barcelo J., Casas J., Ferrer J., Garcia D. Modelling Advanced Transport Telematic Application with Microscopic Simulators: The Case of AIK4SUN2 // Traffic and Mobility: simulation – economics – environment. Springer. Berlin. – 1999. – p.p. 205-221 12. Del Castillo J.M., Benitez F.G. On the functional form of the speed-density relationship. – I.: General theory. “Tramp Res.” 1995, vol.29B, Ms 5. p.p. 373-389. 13. Методы робастного нейро-нечеткого и адаптивного управления. Учебник / под ред. Н.Д. Егунова. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Батмана, 2002. – 744 с. 14. Хейт Ф. Математическая теория транспортных потоков. М.: Мир, 1966. – 286 с.

Поступила в редколлегию 16.04.08